千岛湖片段化生境中木本植物种子雨基本特征及其影响因子

包明慧[1]，方中平[2]，胡来庭[3]，南歌[4]，徐高福[2]，于明坚[1*]

（1. 浙江大学 生命科学学院，杭州 310058；2. 淳安县新安江生态开发集团有限公司，浙江 淳安 311700；3. 淳安县林业局，浙江 淳安 311799；4. 渭南初级中学，陕西 渭南 714099）

摘要：为探究片段化生境中木本植物种子雨的基本特征，该研究根据 2015—2020 年在千岛湖样岛上的植物群落长期监测样地内每月收集的种子雨数据，采用 Kruskal-Wallis 检验对木本植物的种子雨密度进行年际差异分析，对不同传播方式物种的种子雨密度进行月份间差异性分析；并用线性混合效应模型，探究岛屿空间特征（岛屿面积、距最近岛屿的距离、距大陆的距离）以及气候因子（0 °C 以上积温、降水量）对木本植物以及不同传播方式物种的种子雨密度的影响。结果表明：（1）6 年间，29 个样岛共 240 个收集器共收集到 877 178 粒木本植物的成熟种子，属于 26 科 40 属 52 种。（2）动物传播为木本植物主要的种子传播方式。不同传播方式物种的种子雨时间动态存在较大差异。（3）木本植物的种子雨年密度与岛屿面积和年积温呈显著正相关，与年降水量呈显著负相关。（4）自主传播物种的种子雨月密度与距最近岛屿的距离呈显著正相关，而动物传播物种的种子雨月密度雨与距大陆的距离呈显著正相关，风力传播物种的种子雨月密度与月积温呈极显著正相关。生境片段化通过岛屿空间特征影响了木本植物种子雨的时间动态。

关键词：种子雨，传播方式，生境片段化，时间动态，木本植物

中图分类号：Q948　　　　**文献标识码：**A

Basic characteristics and influencing factors of seed rain of woody plant in fragmented habitats in the Thousand Island Lake

BAO Minghui[1], FANG Zhongping[2], HU Laiting[3], NAN Ge[4], XU Gaofu[2], Yu Mingjian[1*]

（1. *College of Life Sciences*, *Zhejiang University*, Hangzhou 310058, China ; 2. *Chun'an Xin'an Jiang Ecological Development Group Co., LTD of Zhejiang*, Chun'an 311700, Zhejiang, China; 3. *Forestry Administration of Chun'an*, Chun'an 311799, Zhejiang, China; 4. *Weinan Junior High School*, Weinan 714099, Shaanxi, China）

基金项目：国家自然科学基金（31930073，31870401）；国家重点研发计划政府间国际科技创新合作专项项目（2018YFE0112800）；浙江省自然科学基金重大项目（LD19C030001）[Supported by National Natural Science Foundation of China (31930073, 31870401); International Collaborative Project of National Key R & D Plan of China (2018YFE0112800); Major Project of Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LD19C030001)]。

第一作者：包明慧（1997-），硕士研究生，从事植物生态学研究，(E-mail)yuannnbao@163.com。

*__通信作者：__于明坚，博士，教授，研究方向为植物生态学和生物多样性，(E-mail)fishmj@zju.edu.cn。

Abstract: Seed rain can affect species composition, forest community diversity, and plant population and community renewal. Studying the characteristics of seed rain is of great significance for in-depth research on regeneration strategies and restoration of plant population. In order to explore the basic characteristics of seed rain in fragmented habitats, this study used monthly seed rain data collected from 2015 to 2020, and used the Kruskal-Wallis test to analyze the annual difference of the seed rain density of woody plant, and to analyze the monthly difference of the seed rain density of species with different dispersal syndromes. Then we used linear mixed-effect models to test the relationships among island spatial attributes (i.e., island area, the distance to the mainland, and the distance to the nearest island), climatic factors (i.e., accumulated temperature above 0 degrees, precipitation) and seed rain density of woody plant and species with different dispersal syndromes. The results were as follows: (1) During the six years, a total of 877 178 mature seeds of woody plant were collected from 240 seed traps in 29 study islands, belonging to 26 families, 40 genera and 52 species. (2) Zoochory was the major dispersal syndrome in the Thousand Island Lake. There are great differences in the temporal dynamics of seed rain in different dispersal syndromes. (3) The annual density of seed rain of woody plant was significantly positively correlated with island area and annual accumulated temperature, and significantly negatively correlated with annual precipitation. (4) The monthly density of seed rain of autochory was significantly positively correlated with the distance to the nearest island, while that of zoochory was significantly positively correlated with the distance to the mainland, and that of anemochory was significantly positively correlated with the monthly accumulated temperature. Habitat fragmentation affect the temporal dynamics of the seed rain of woody plant through island spatial attributes.

Key words: seed rain, dispersal syndrome, habitat fragmentation, temporal dynamic, woody plant

种子雨是指种子植物的种子或果实从母树向地表散落的过程（杜彦君和马克平，2012a）。种子雨是森林种群和群落更新的关键因子之一（Perini et al., 2019）。种子雨的时间动态是种子雨的基本特征之一，主要表现为群落、种群和个体水平上的季节动态和年际变化（于顺利等，2007; Wang et al., 2017）。同时，种子雨也可作为种群和群落动态的指标，因为它受环境中的生物因子和非生物因子影响，这些因子包括温度和降水等非生物因子以及物种自身生物学—生态学特征如种子传播方式等（Rahbek, 2005; Barrett, 2013; Zhang et al., 2013）。del Cacho 等（2013）发现，温度升高、年降雨量增加提升了多花欧石楠(*Erica multiflora*)的种子雨产量。BCI（Barro Colorado Island）50 hm^2 森林动态监测样地中的 41 个树种的研究发现，种子传播方式相同的不同物种，种子越重，传播距离越近（Muller-Landau et al., 2008）。

种子的传播方式可分为自主传播与借物传播，其中借物传播又可分为水力传播、风力传播以及动物传播等三大类。自主传播是指种子通过本身的构造机能，经由重力、弹跳或旋钻等的方式离开母体甚或入土。种子因动物的携带而传播到他处称为动物传播。靠风力传播的传播方式称为风力传播（郭华仁，2019）。种子雨的季节性动态由不同的种子传播策略驱动（Li et al., 2012）。风力传播的物种倾向于在干季果实成熟，相反动物传播物种倾向于在雨季果实成熟；这已经在多项研究中得到了验证，例如厄多瓜尔的季节性干旱热带森林（Jara-Guerrero et al., 2020）、巴西卡廷加旱生热带林（Griz & Machado, 2001）。虽然种子传播对维持种群和群落结构等功能至关重要，但在片段化的生境中，它是被破坏最严重的过程之一（Burns, 2005; McConkey et al., 2012; Emer et al., 2018）。

生境片段化是指连续的生境被分割成多个相互隔离的小斑块（片段）的过程（Wilcove et al., 1986），以及其带来的生境面积减小、生境隔离度增加和边缘效应增强等过程（Fischer, 2006）。生境片段化通常会导致生物同质化，从而导致群落以喜光和耐旱物种为主（Lobo et al., 2011）；并且加剧了物种之间的竞争，减少了物种多样性（Bregman et al., 2015）。同时，生境片段化可导致种子传播者多度和丰富度的改变，尤其是大型种子扩散者的减少（Hagen et al., 2012），破坏了动物对种子的有效传播，减少了动物传播植物的补员率（Cordeiro & Howe, 2003; Lehouck et al., 2009），并导致植物灭绝概率最高可达 10 倍（Caughlin et al., 2014）。

在森林群落演替中，种子雨的动态为植物种群更新的限制因子（Barnes, 2001）。因此，探究种子雨基本特征及其影响因子，对深入了解植物种群更新和群落演替趋势有着重要的意义。迄今片段化生境中种子雨的研究主要集中在种子雨基本特征、种子雨的物种属性（如丰富度、生活型、扩散方式、演替状态以及种子重量等），以及是否与片段化生境下斑块的空间特征（斑块的面积、数量以及边缘梯度）等有关（Burns, 2005; Jesus et al., 2012; Knorr & Gottsberger, 2012; McConkey et al., 2012; Freitas et al., 2013; Emer et al., 2018; Arreola et al., 2020; Camargo et al., 2020）。但从种子雨密度出发，探究生境片段化对不同传播方式物种的种子雨密度影响的研究仍然较少（San-Jose et al., 2020）。位于我国亚热带区域的千岛湖，因水库大坝建设，形成了 1 000 多个相互隔离的陆桥岛屿，是研究生境片段化对植物种群更新和群落演替影响的理想平台。本研究以千岛湖片段化生境为研究区域，利用2015—2020 年间的种子雨数据，使用了非参数检验以及线性混合模型等统计方法，拟探讨以下问题：（1）千岛湖岛屿上木本植物种子雨基本概况；（2）种子雨的时间动态；（3）气候因子以及生境片段化是否以及如何影响种子雨的时间动态。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究地点位于浙江省杭州市淳安县境内的新安江水库（29°22′—29°50′ N、118°34′—119°15′ E），亦称千岛湖，是 1959 年新安江水电站建设蓄水形成的大型水库，水域面积约 540 km^2。该地区为典型的亚热带季风气候，温暖湿润，四季分明，雨热同期。年平均气温 17 °C，年最高气温 41.8 °C，年最低气温为-7.6 °C，年平均降水量 1 430 mm（钟雨辰，2020）。水库大坝建设后岛上的原有森林基本被砍伐，同步开始次生演替，至今已有 60 余年（Liu et al., 2020）。森林覆盖率>88.5%，主要为次生马尾松（*Pinus massoniana*）林。马尾松为建群种，林下则以檵木（*Loropetalum chinense*）、短尾越桔（*Vaccinium carlesii*）和杜鹃（*Rhododendron simsii*）等小乔木和灌木为主（Liu et al ., 2020）。

1.2 种子雨收集器的布置

我们选取 29 个人为干扰较少且以马尾松林为主的岛屿作为植物群落样岛（图 1，附表 1）。2009—2010 年，我们在样岛上建立了共 12.7 ha 的植物群落长期监测样地，对样地内胸径 1 cm 以上的木本植物进行挂牌和调查，并于 2014—2015 年完成第一次复查工作（附表 2）。在 29 个岛屿的样地内设置种子雨收集器，在间距 10～15 m 的每个 5 m × 5 m 小样方中设置一个。种子雨收集器由 0.71 m × 0.71 m（0.5 m^2）的 PVC 框和 1 mm 网目的尼龙网组成，再用 4 个高 0.8 m 的 PVC 管固定（南歌，2017）。29 个样岛的样地内共设置了 240 个种子雨收集器。于 2015 年 1 月至 2020 年 12 月，每月对种子雨收集器内果实、种子进行一次收集，并带回实验室用烘箱 80 °C 烘 48 h 后，将收集物分成 8 类，分别为：成熟果实、成熟种子、果皮果荚、碎片、未成熟的果实、花、动物咬过的果实、动物咬过的种子，对照花、果实、种子图谱进行物种识别，记数并称重（若果实中不只含有一颗种子，果实里的种子数也要进行计数）（杜彦君和马克平，2012b）。成熟果实主要根据体积、形

状、色泽等；若无法由外观决定，则可通过胚的形态和质地决定（杜彦君和马克平，2012a）。

编号表示岛屿号。

Code indicates island number.

图 1 千岛湖样岛分布图

Fig.1 Study islands in the Thousand Island Lake

1.3 数据分析与处理

本研究数据为 2015 年 1 月至 2020 年 12 月间收集的 71 次种子雨数据（2020 年 8 月—9 月只收集了一次数据）。根据果实类型、种子特征并结合野外实地观察以及文献参考（杜彦君和 马克平，2012b；Liu et al., 2019a），确定每个物种种子（果实）的传播方式，本研究将物种分为动物传播、自主传播和风力传播三大类。种子雨密度用每平方米收集到的种子数量表达，即：种子雨密度（粒·m^{-2}）=该物种在某岛屿上收集到的种子总粒数/对应岛屿的收集器总面积。气象数据为 2015—2020 年淳安县气象数据（附图 1）。因种子雨密度不满足整正态性和方差齐性，故采用 Kruskal-Wallis 检验对木本植物的种子雨密度进行年际差异分析，对不同传播方式物种的种子雨密度进行月份间差异分析；并用线性混合效应模型，探究岛屿空间特征（岛屿面积、距最近岛屿的距离、距大陆的距离）以及气候因子（0 °C 以上积温、降水量）对木本植物以及不同传播方式物种的种子雨密度的影响。考虑到种子雨数据在不同月份和不同岛屿上的非独立性，在探究种子雨月密度变化的影响因子时，将月份和岛屿编号作为随机截距项；而在探究种子雨年密度变化的影响因子时，将岛屿编号作为随机截距项。以上非参数检验以及线性混合效应模型的分析，种子雨密度、岛屿面积均进行了 log 对数转化。因为 0 °C 以上积温与温度显著相关（Pearson 相关性检验：$r = 0.99$，$P < 0.001$），故只选择了积温作为固定项进行分析。线性混合效应模型用 lmer 软件包完成，使用 ggplot2 软件包进行作图，以上分析均在 R 4.1.0 软件（R Core Team , 2021）中完成。

2 结果与分析

2.1 种子雨概况

在 2015—2020 年 6 年中，29 个岛屿共 240 个收集器共收集到 877 178 粒木本植物的成熟种子，属于 26 科 40 属 52 种[其中金樱子（*Rosa laevigata*）、楝（*Melia azedarach*）、构树（*Broussonetia papyrifera*）为样地调查没记录到的物种]。在 2014—2015 年样地复查中，29 个岛屿的样地内共记录到 74 种木本植物，共有 25 个物种没有收集到成熟种子。收集到种子数最多的 10 个物种分别为：毛果南烛（*Lyonia ovalifolia* var. *hebecarpa*）、短尾越橘、

格药柃（*Eurya muricata*）、马银花（*Rhododendron ovatum*）、马尾松、枫香树（*Liquidambar formosana*）、牡荆（*Vitex negundo* var. *cannabifolia*）、檵木、刺柏（*Juniperus formosana*）和木荷（*Schima superba*）。种子雨收集到的果实类型主要为核果和蒴果（附表 3）。从种子传播方式来看，动物传播的物种数量远高于风力传播与自主传播，分别占物种总数的 73.58%、13.21%、13.21%（表 1），故动物传播是千岛湖马尾松林木本植物主要的种子传播方式。

表 1 研究期间千岛湖 29 个样岛不同传播方式物种的种子雨概况

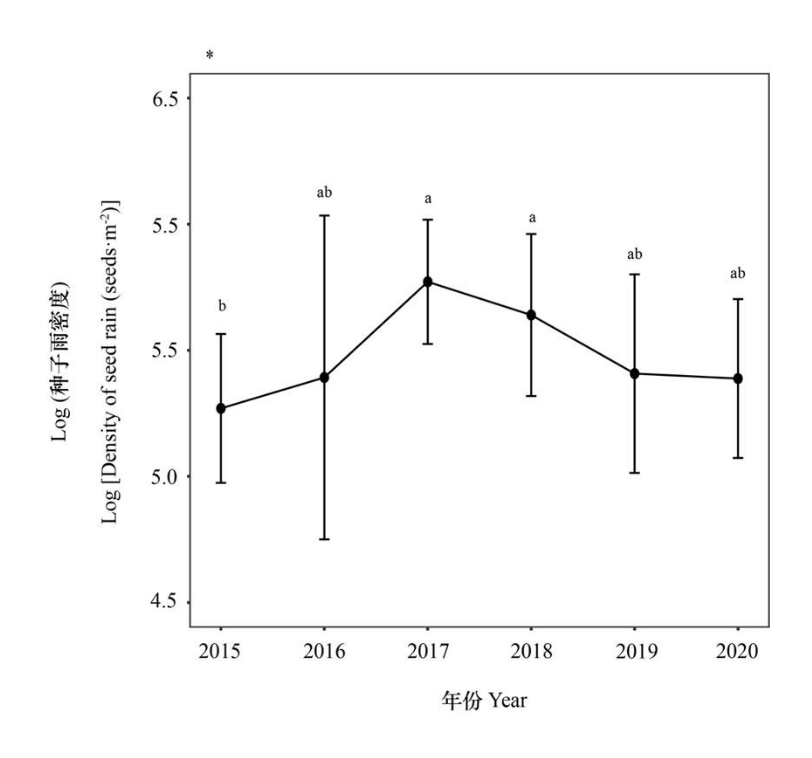
Table1 Basic informations of seed rain of species with different dispersal syndromes on 29 study islands in the Thousand Island Lake during the study period

传播方式 Dispersal syndrome	物种数 Number of species	物种百分比 Percentage of species (%)	种子总数 Number of seeds	种子总数百分比 Percentage of total seeds (%)
动物传播 Zoochory	39	73.58	332 430	37.90
风力传播 Anemochory	7	13.21	106 120	12.10
自主传播 Autochory	7	13.21	438 628	50.00
合计 Total	53	100.00	877 178	100.00

2.2 种子雨时间动态

2.2.1 木本植物种子雨的年际变化

Kruskal-Wallis 检验表明，2017 年和 2018 年的种子雨密度均显著高于 2015 年的种子雨密度（$P < 0.05$），其余年份之间差异不显著（图 2）。



*表示 $P<0.05$，**表示 $P<0.01$，***表示 $P<0.001$。不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）。误差棒代表 95%的置信区间。下同。

* indicates P<0.05, ** indicates P<0.01, *** indicates P <0.001. Different letters indicate significant differences（P < 0.05）. Error bars represent 95% confidence intervals. The same below.

图 2 研究期间木本植物的种子雨年密度

Fig.2 Annual density of seed rain of woody plant during the study period

2.2.2 不同传播方式物种种子雨季节变化

不同传播方式物种的种子雨时间动态存在较大差异。动物传播物种的种子雨密度在 8 月至翌年 1 月间达到高峰，在 3—5 月间达到低谷；风力传播的种子雨密度在 1—2 月间达到高峰，在 6—8 月间达到低谷；而自主传播的种子雨密度在 2—6 月呈上升趋势，但由于相较于其他传播方式变异幅度较大，没有显著的高峰或低谷（图 3）。

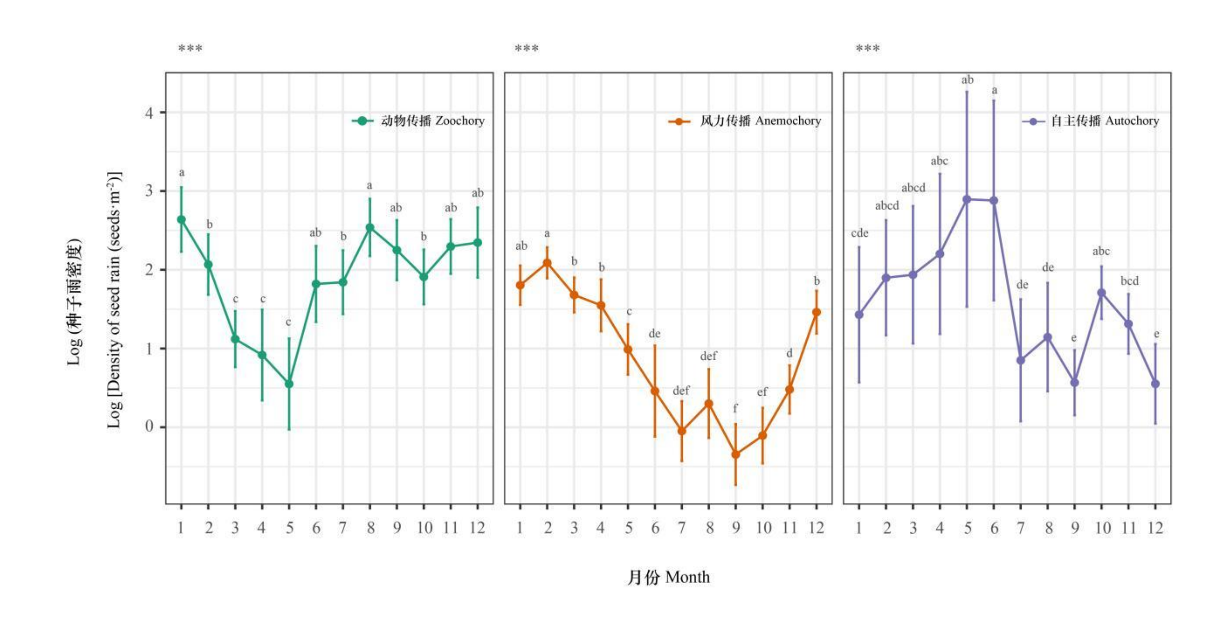


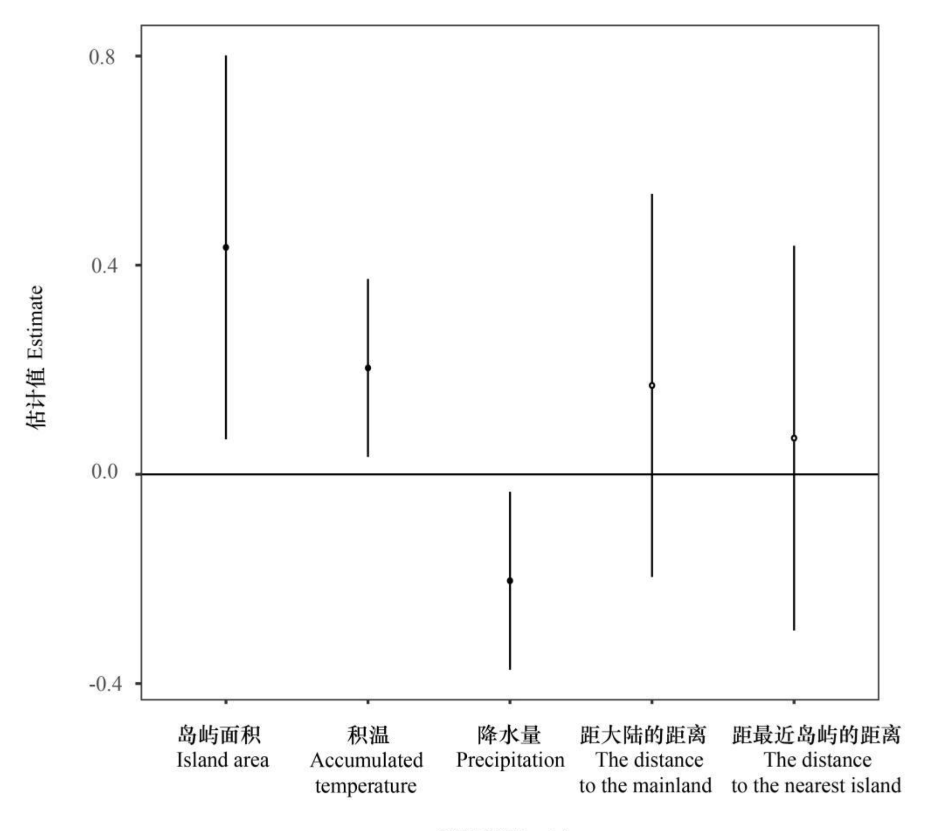
图 3 研究期间不同传播方式物种的种子雨月密度

Fig.3 Monthly density of seed rain of species with different dispersal syndromes during the study period

2.3 影响种子雨时间动态的因子

2.3.1 木本植物种子雨时间动态的影响因子

线性混合效应模型表示，木本植物的种子雨年密度与岛屿面积和年积温呈显著正相关（P<0.05），而与年降水量呈显著负相关（P<0.05）（图 4）。



实心表示该固定项显著，空心表示该固定项不显著。下同。

Solids indicate that the fixed item is significant, and hollows indicate that the fixed item is not significant. The same below.

图 4 木本植物种子雨时间动态的影响因子

Fig.4 Influencing factors of the temporal dynamics of seed rain of woody plant

2.3.2 不同传播方式物种种子雨时间动态的影响因子

线性混合效应模型结果显示，不同传播方式物种的种子雨月密度对月积温、月降水量、岛屿面积、距最近岛屿的距离以及距大陆的距离具有不同程度的响应。自主传播物种的种子雨密度与距最近岛屿的距离呈显著正相关（P<0.05），风力传播物种的种子雨密度与月积温呈极显著正相关（P<0.001），动物传播物种的种子雨密度与距大陆的距离呈显著正相关（P<0.05）（图 5）。

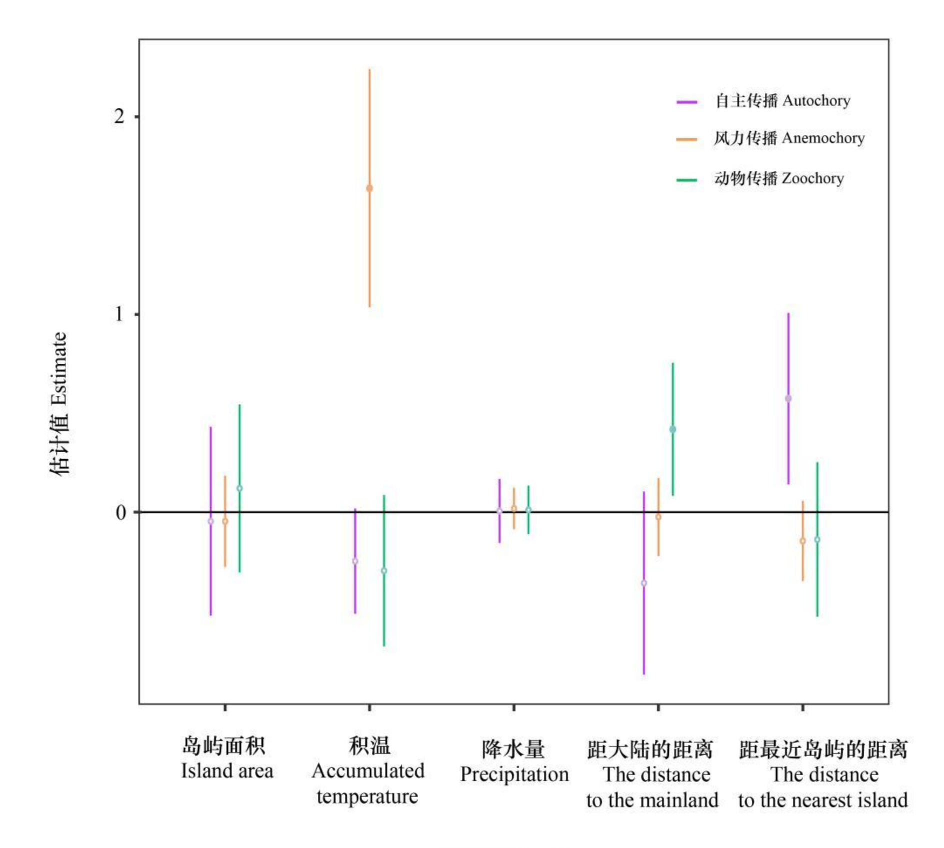


图 5 不同传播方式物种种子雨时间动态的影响因子

Fig.5 Influencing factors of the temporal dynamics of seed rain of species with different dispersal syndromes

3 讨论

6 年间种子雨共收集到 52 个木本物种的种子，占千岛湖样地木本植物物种总数的 67%。有 33%的物种未收集到种子，其主要原因是存在种子限制（肖静等，2019），包括扩散限制和源限制（Luo et al., 2013）。扩散限制是指种子不可能到达每个能支持萌发的地方；源限制是指由于是指母树的种子产量低而影响幼苗的增补（Schupp et al., 2002）。而这些未收到种子的物种，在样地中多度较低（仅占物种总多度的 0.2%），缺少母树，种子产量低。同时，这些物种超过半数为灌木，树高较低（平均树高在 1.7~3.3 m），种子的扩散距离有限，难以被收集。几年后这些未收集到种子的物种更新会十分困难。

3.1 不同传播方式物种种子雨的季节动态

动物传播是千岛湖马尾松林木本植物主要的种子传播方式，这与其他亚热带森林种子雨研究结果一致（Du et al., 2009），也与热带森林种子雨研究结果一致（Frankie et al.,1974; Lieberman, 1982）。在千岛湖的马尾松林中，动物传播者主要是鸟类和啮齿类动物，并且鸟类传播物种数要大于哺乳动物传播物种数（Liu et al., 2019a）。这是因为鸟类通常是片段化森林中最重要的种子传播者，在森林恢复的早期参与种子传播（Pejchar et al., 2008; Garcia et al., 2010; Carlo & Morales, 2016; Martinez & Garcia, 2017），最终导致鸟类传播植物的比例更高。例如，墨西哥的一项研究表明，在实验性次生林中增补物种大多数是鸟类或蝙蝠扩散的物种（de la Pena-Domene et al., 2014）。由于它们的流动性高，所以它们是森

林斑块中有效的种子散播者，并通过种子沉积来连接不同生境片段（Garcia et al., 2010; Heleno & Vargas, 2015）。

植物往往倾向于在对其传播有利的时候进入繁殖期，以此最大幅度地提高种子扩散率和幼苗的萌发率。本研究结果显示，风力传播与动物传播的物种均在秋冬季节达到种子雨密度的高峰。这种在秋冬季节出现结实高峰的现象，可以通过幼苗的建立来解释。例如，秋冬季风力更强，可使种翅充分展开，有利于翅果的传播（Sharpe & Fields, 1982）。大多数自主传播物种的种子具有干燥的特征（大部分物种的果实为蒴果或荚果，可开裂），秋冬的低湿有利于它们开裂以及种子的释放（Bullock, 1995; Batalha & Martins, 2004）。如果亚热带森林中大部分种子在雨水较为充沛的夏季传播，那么种子将会很快发芽，幼苗将经历漫长的冬季，这将不利于幼苗的建立。而在秋冬扩散的种子，由于水分与温度的限制，种子无法立刻萌发。到了翌年的 3—4 月，种子获得足够的水分以及适宜的温度而萌发，接着又经历几个月的生长，幼苗变得足够强壮，能抵挡翌年冬天的干旱以及低温（杜彦君和马克平，2012b），这也与华南地区香港灌丛繁殖物候的研究结果相似（Corlett & Richard, 1993）。同时种子经过冬天的低温层积，可打破种子的休眠，从而增加种子的萌发率。而在热带干旱森林的种子雨研究中，雨季是动物传播物种结实及种子传播的高峰期，这是因为在热带森林中，雨季是动物传播物种传播者的活动高峰期（Jara-Guerrero et al., 2020）。

3.2 影响种子雨时间变化的因子

本研究表明，木本植物种子雨的年密度与岛屿面积呈显著正相关。Liu 等（2019b）对千岛湖植物分布的研究表明，耐阴种的生物量与岛屿面积显著正相关，而非耐阴种则没有这种变化趋势。在本研究中，耐阴植物种子数占种子雨总产量的 40%，而树木的生物量在一定范围内与种子产量呈正比（Greene & Johnson, 1994）。即由于耐阴种的生物量随着岛屿面积增加而增加，提高了耐阴种的种子产量，故木本植物的种子雨密度随着面积增加而增加。同时，受边缘效应影响，面积较小的岛屿更容易受到周围环境或者基质干扰的影响，如水土流失严重（邬建国，2000），进而导致面积较小的岛屿的种子产量下降。

种子产量与开花期有关（del Cacho et al., 2013）。影响开花期三个主要气候因子是温度、光周期和降水量，温度和降水量会因气候变化而显著改变（Rathcke & Lacey, 1985），从而导致开花物候的变化，进而使种子产量受到开花期对气候变化的影响（Llorens & Penuelas, 2005; Ogaya & Penuelas, 2004, 2007; Penuelas et al., 2002）。千岛湖木本植物的种子雨年密度与年降水量呈显著负相关。Niklas（1985）的研究反映：空气湿度增加可以降低花粉的传播能力，从而影响种子产量。故降水量的增加会影响植物传粉，进而对种子雨密度产生了负效应。千岛湖木本植物的种子雨年密度与年积温之间呈显著正相关，可以从温度对植物的性能产生影响这一角度解释。一方面，温度升高可以缓解开花期较低的温度对植物的负面影响，以此来提高植物繁殖性能（del Cacho et al., 2013）。另一方面，之前的研究也表明实验性地升高温度会促进植物的营养生长（Penuelas et al., 2004; Penuelas et al., 2007）。因此，在开花期增加平均温度会通过促进植物的营养生长和繁殖能力，从而提高种子的产量（del Cacho et al., 2013）。

本研究表明，动物传播物种的种子雨月密度与距大陆的距离呈显著正相关，即岛屿离大陆距离越近，岛屿上动物传播物种的种子雨密度越低。这可以根据岛屿生物地理学中的“距离效应”来解释，即岛屿距离大陆越近，则物种的迁入率越高，反之越低（Macarthur & Wilson, 1963; MacArthur et al., 1967）。迁入率越高则意味着有更多的植物和动物迁入岛屿，越多的哺乳动物迁入岛屿，导致越多的动物传播物种的种子被哺乳动物取食或散播（García & Chinea, 2014），而我们设立的种子雨收集器收集到的大多是直接从树上掉落的

果实和种子以及一部分鸟类取食果实后排出的种子，故哺乳动物取食或散播种子越多，种子雨收集器收集到的种子数量越低。

本研究发现自主传播物种的种子雨月密度与距最近岛屿的距离成正比。Liu 等（2020）的研究表明，在千岛湖片段化生境中，同种个体的空间作用强度（即它们之间的负相互作用）随着距最近岛屿的距离的增加而增加。这是因为在片段化生境中，植物及其天敌的具有较高的扩散限制，从而导致宿主-天敌之间的相互作用或种内竞争更加更激烈（Adler & Muller-Landau, 2005）。自主传播的扩散限制较强（雷霄，2014），在这种激烈的相互作用与种内竞争背景下，植物会通过增加种子产量，降低种子质量等方式来提高物种的存活率（Leslie et al., 2017）。因此，自主传播物种的种子雨月密度与距最近岛屿的距离成正比。

千岛湖风力传播物种的种子雨月密度与月积温呈极显著正相关，而积温对自传播和动物传播产生负效应。种子产量的变化是由于温度、降水等环境因子的改变产生的一种进化策略（Walter & Johannes, 2000），而不同生存策略的植物在种子数量上的变化上有不同的体现：大种子植物往往会选择产出质量更大、数量更少的种子，而小种子植物往往会选择产出质量更小、数量更多的种子（Leishman et al., 1995; Moles & Westoby, 2004）。风力传播物种种子平均质量最小，动物传播物种种子平均质量最大。故温度增加时，风力传播植物会选择产生更多更小的种子，而对于动物传播植物来说，会产生更少更大的种子，自主传播植物的种子平均质量介于二者之间，可能选择的是产生更少更大的种子。而在本研究中，动物传播与自主传播的种子雨密度还分别与距大陆的距离和距最近岛屿的距离呈显著正相关，从而导致积温对动物传播与自主传播的种子雨密度的负效应不显著。

4 结论

动物传播为千岛湖地区木本植物主要的种子传播方式；木本植物以及不同传播方式物种的种子雨密度对气候因子和岛屿空间特征的响应程度不同，生境片段化通过岛屿空间特征影响了种子雨的时间动态。本研究仅使用了 6 a 的种子雨监测数据，后期可继续对千岛湖种子雨进行监测，同时可以将种子雨与后续生活史阶段进行比较研究，进一步探究片段化生境中植物群落的更新机制。

致　谢　感谢浙江省淳安县新安江生态开发集团有限公司和淳安县林业局对本项目实施提供的支持；感谢巫东豪、阮振、千岛湖当地姜成仙、严建春、姜泉桂、周国娥以及童丽英等村民对种子雨收集和分类做出的贡献；感谢刘娟、韦博良、仲磊和刘金亮等对文章的撰写提出的宝贵意见。

参考文献:

ADLER FR, MULLER-LANDAU HC, 2005. When do localized natural enemies increase species richness? [J]. Ecol Lett, 8(4): 438-447.

ARREOLA FC, QUINTANA-ASCENCIO PF, RAMIREZ-MARCIAL N, et al., 2020. Seed rain and establishment in successional forests in Chiapas, Mexico [J]. Acta Bot Mex, 127(3): e1618.

BARRETT SCH, 2013. The evolution of plant reproductive systems: how often are transitions irreversible? [J]. Proc Roy Soc B-Biol Sci, 280(1765): 20130913.

BARNES ME, 2001. Seed predation, germination and seedling establishment of *Acacia erioloba* in northern Botswana [J]. J Arid Environ, 49(3): 541-554.

BATALHA MA, MARTINS FR, 2004. Reproductive phenology of the cerrado plant community in Emas National Park (central Brazil) [J]. Aust J Bot, 52(2): 149-161.

BREGMAN TP, LEES AC, SEDDON N, et al., 2015. Species interactions regulate the collapse of biodiversity and ecosystem function in tropical forest fragments [J]. Ecology, 96(10): 2692-2704.

BULLOCK SH, 1995. Plant reproduction in neotropical dry forests [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 277-303.

BURNS KC, 2005. A multi-scale test for dispersal filters in an island plant community [J]. Ecography, 28(4): 552-560.

CAMARGO P, PIZO MA, BRANCALION PHS, et al., 2020. Fruit traits of pioneer trees structure seed dispersal across distances on tropical deforested landscapes: Implications for restoration [J]. J Appl Ecol, 57(12): 2329-2339.

CARLO TA, MORALES JM, 2016. Generalist birds promote tropical forest regeneration and increase plant diversity via rare-biased seed dispersal [J]. Ecology, 97(7): 1819-1831.

CAUGHLIN TT, FERGUSON JM, LICHSTEIN JW, et al., 2014. Loss of animal seed dispersal increases extinction risk in a tropical tree species due to pervasive negative density dependence across life stages [J]. Proc Roy Soc B-Biol Sci Ser B, 282(1798): 20142095.

CORDEIRO NJ, HOWE HF, 2003. Forest fragmentation severs mutualism between seed dispersers and an endemic African tree [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 100(24): 14052-14056.

CORLETT RT, 1993. Reproductive phenology of Hong Kong shrubland [J]. J Trop Ecol, 9(04): 501.

DE LA PENA-DOMENE M, MARTINEZ-GARZA C, PALMAS-PEREZ S, et al., 2014. Roles of birds and bats in early tropical-forest restoration [J]. PLoS ONE, 9(8): 1-6.

DEL CACHO M, ESTIARTE M, PENUELAS J, et al., 2013. Inter-annual variability of seed rain and seedling establishment of two woody Mediterranean species under field-induced drought and warming [J]. Popul Ecol, 55(2): 277-289.

DU YJ, MI XC, LIU XJ, et al., 2009. Seed dispersal phenology and dispersal syndromes in a subtropical broad-leaved forest of China [J]. For Ecol Manage, 258(7): 1147-1152.

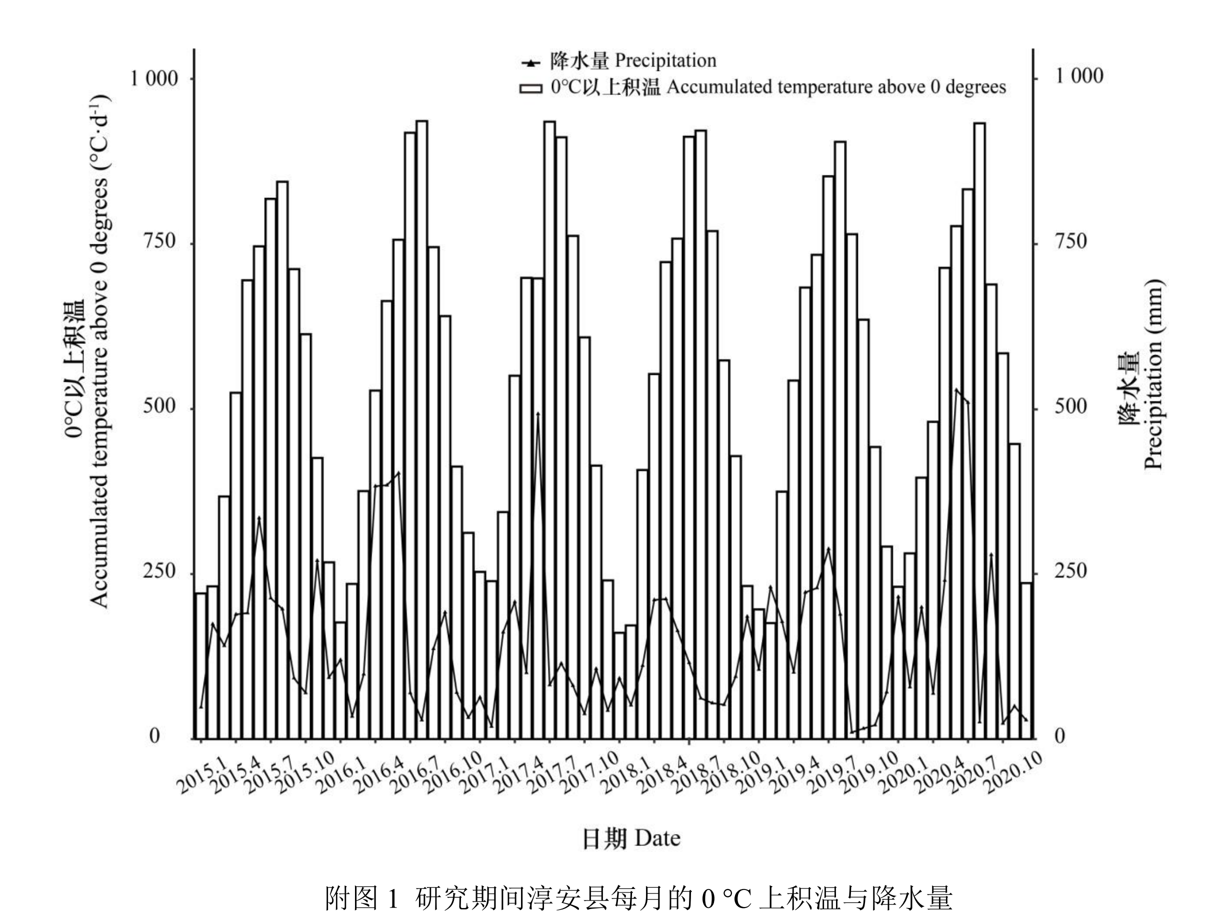
DU YJ, MA KP, 2012a. Advancements and prospects in forest seed rain studies [J]. Biodivers Sci, 20(1): 94-107. [杜彦君，马克平，2012a. 森林种子雨研究进展与展望 [J]. 生物多样性，20(1): 94-107.]

DU YJ, MA KP, 2012b. Temporal and spatial variation of seed rain in a broad-leaved evergreen forest in Gutianshan Nature Reserve of Zhejiang Province, China [J]. Chin J Plant Ecol , 36(8): 717-728. [杜彦君，马克平，2012b. 浙江古田山自然保护区常绿阔叶林种子雨的时空变异 [J]. 植物生态学报，36(8): 717-728.]

EMER C, GALETTI M, PIZO MA, et al., 2018. Seed-dispersal interactions in fragmented landscapes-a metanetwork approach [J]. Ecol Lett, 21(4): 484-493.
FISCHER J, 2006. Habitat fragmentation and landscape Change: An Ecological and Conservation Synthesis [M]. Washington, DC: Island Press: 89-120.
FRANKIE GW, BAKER HG, OPLER PA, 1974. Comparative phenological studies of trees in tropical wet and dry forests in the lowlands of Costa Rica [J]. J Ecol, 62(3): 881-919.
FREITAS CG, DAMBROS C, CAMARGO JLC, 2013. Changes in seed rain across Atlantic Forest fragments in Northeast Brazil[J]. Acta Oecol, 53(11): 49-55.
GARCÍA AA, CHINEA D, 2014. Seed rain under native and non-native tree species in the Cabo Rojo National Wildlife Refuge, Puerto Rico [J]. Rev Biol Trop, 62(3): 1129-1136.
GARCIA D, ZAMORA R, AMICO GC, 2010. Birds as suppliers of seed dispersal in temperate ecosystems: conservation guidelines from real-world landscapes [J]. Conserv Biol, 24(4): 1070-1079.
GUO HR, 2019. Seed Biology [M]. Beijing: Beijing United Publishing Co., Ltd:176-181. [郭华仁，2019. 种子学 [M]. 北京: 北京联合出版公司: 176-181.]
GREENE DF, JOHNSON EA, 1994. Estimating the mean annual seed production of trees [J]. Ecology, 75(3): 642-647.
GRIZ LMS, MACHADO ICS, 2001. Fruiting phenology and seed dispersal syndromes in caatinga, a tropical dry forest in the northeast of Brazil [J]. J Trop Ecol, 17(2): 303-321.
HAGEN M, KISSLING WD, RASMUSSEN C, et al., 2012. Biodiversity, species interactions and ecological networks in a fragmented world [M]. San Diego: Advances in Ecological Research: 89-210.
HELENO R, VARGAS P, 2015. How do islands become green? [J]. Glob Ecol Biogeogr, 24(5): 518-526.
JARA-GUERRERO A, ESPINOSA CI, MENDEZ M, et al., 2020. Dispersal syndrome influences the match between seed rain and soil seed bank of woody species in a Neotropical dry forest [J]. J Veg Sci, 31(6): 995-1005.
JESUS FM, PIVELLO VR, MEIRELLES ST, et al., 2012. The importance of landscape structure for seed dispersal in rain forest fragments [J]. J Veg Sci, 23(6): 1126-1136.
KNORR UC, GOTTSBERGER G, 2012. Differences in seed rain composition in small and large fragments in the northeast Brazilian Atlantic Forest [J]. Plant Biol, 14(5): 811-819.
LEHOUCK V, SPANHOVE T, COLSON L, et al., 2009. Habitat disturbance reduces seed dispersal of a forest interior tree in a fragmented African cloud forest [J]. Oikos, 118(7): 1023-1034.
LEISHMAN MR, WESTOBY M, JURADO E, 1995. Correlates of seed size variation: a comparison among five temperate floras [J]. J Ecol, 83(3): 517-529.
LEI X, 2014. The temporal and spatial distribution characteristics of seed rain by different dispersal modes in an evergreen broad-leaved forest in Tiantong, Zhejiang Province, Eastern China [D]. Shanghai: East China Normal University: 1-62. [雷霄，2014. 浙江天童常绿阔叶林不同传播方式物种种子雨时空分布特征 [D]. 上海: 华东师范大学: 1-62.]
LESLIE AB, BEAULIEU JM, MATHEWS S, 2017. Variation in seed size is structured by dispersal syndrome and cone morphology in conifers and other nonflowering seed plants [J]. New Phytol, 216(2): 429-437.
LI BH, HAO ZQ, BIN Y, et al., 2012. Seed rain dynamics reveals strong dispersal limitation,

different reproductive strategies and responses to climate in a temperate forest in northeast China [J]. J Veg Sci, 23(2): 271-279.
LIEBERMAN D, 1982. Seasonality and phenology in a dry tropical forest in Ghana [J]. J Ecol, 70(3): 791-806.
LIU JL, MATTHEWS TJ, ZHONG L, et al., 2020. Environmental filtering underpins the island species-area relationship in a subtropical anthropogenic archipelago [J]. J Ecol, 108(2): 424-432.
LIU JJ, SLIK F, COOMES DA, et al., 2019a. The distribution of plants and seed dispersers in response to habitat fragmentation in an artificial island archipelago [J]. J Biogeogr, 46(6): 1152-1162.
LIU JJ, COOMES DA, HU G, et al., 2019b. Larger fragments have more late-successional species of woody plants than smaller fragments after 50 years of secondary succession [J]. J Ecol, 107(2): 582-594.
LLORENS L, PENUELAS J, 2005. Experimental evidence of future drier and warmer conditions affecting flowering of two co-occurring Mediterranean shrubs [J]. Int J Plant Sci, 166(2): 235-245.
LOBO D, LEAO T, MELO FPL, et al., 2011. Forest fragmentation drives Atlantic forest of northeastern Brazil to biotic homogenization [J]. Divers Distrib, 17(2): 287-296.
LUO Y, HE F, YU SX, 2014. Recruitment limitation of dominant tree species with varying seed masses in a subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. Comm Ecol, 14(2): 189-195.
MACARTHUR RH, WILSON EO, 1963. Equilibrium-theory of insular zoogeography [J]. Evolution, 17(4): 373-387.
MACARTHUR RH, WILSON EO, MACARTHUR RH, et al., 1967. The theory of island biogeography [M]. New Jersey: Princeton University Press: 8-18.
MARTINEZ D, GARCIA D, 2017. Role of avian seed dispersers in tree recruitment in woodland pastures [J]. Ecosystems, 20(3): 616-629.
MCCONKEY KR, PRASAD S, CORLETT RT, et al., 2012. Seed dispersal in changing landscapes [J]. Biol Conserv, 146(1): 1-13.
MOLES AT, WESTOBY M, 2004. Seedling survival and seed size: a synthesis of the literature [J]. J Ecol, 92(3): 372-383.
MULLER-LANDAU HC, WRIGHT SJ, CALDERON O, et al., 2008. Interspecific variation in primary seed dispersal in a tropical forest [J]. J Ecol, 96(4): 653-667.
NAN G, 2017. Composition and dynamics of seed rain and soil seed bank in fragmented masson pine forests in the Thousand Island Lake region [D]. Jinhua: Zhejiang Normal University: 1-67. [南歌，2017. 千岛湖库区马尾松林内种子雨和土壤种子库组成及动态 [D]. 金华: 浙江师范大学: 1-67.]
NIKLAS KJ, 1985. The aerodynamics of wind pollination [J]. Bot Rev, 51(3): 328-386.
OGAYA R, PENUELAS J, 2004. Phenological patterns of *Quercus ilex*, *Phillyrea latifolia*, and *Arbutus unedo* growing under a field experimental drought [J]. Ecoscience, 11(3): 263-270.
OGAYA R, PENUELAS J, 2007. Species-specific drought effects on flower and fruit production in a Mediterranean holm oak forest [J]. Forestry, 80(3): 351-357.
PEJCHAR L, PRINGLE RM, RANGANATHAN J, et al., 2008. Birds as agents of seed dispersal in a human-dominated landscape in southern Costa Rica [J]. Biol Conserv, 141(2): 536-544.
PENUELAS J, FILELLA I, COMAS P, 2002. Changed plant and animal life cycles from 1952 to 2000 in the Mediterranean region [J]. Glob Change Biol, 8(6): 531-544.

PENUELAS J, FILELLA I, ZHANG XY, et al., 2004. Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes [J]. New Phytol, 161(3): 837-846.
PENUELAS J, PRIETO P, BEIER C, et al., 2007. Response of plant species richness and primary productivity in shrublands along a north-south gradient in Europe to seven years of experimental warming and drought: reductions in primary productivity in the heat and drought year of 2003 [J]. Glob Change Biol, 13(12): 2563-2581.
PERINI M, DIAS HM, KUNZ SH, 2019. The role of environmental heterogeneity in the seed rain pattern [J]. Floresta Ambiente, 26(1): 1-10.
RAHBEK C, 2005. The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns [J]. Ecol Lett, 8(2): 224-239.
RATHCKE B, LACEY EP, 1985. Phenological patterns of terrestrial plants [J]. Annu Rev Ecol Syst, 16(6): 179-214.
SAN-JOSE M, ARROYO-RODRIGUEZ V, MEAVE JA, 2020. Regional context and dispersal mode drive the impact of landscape structure on seed dispersal [J]. Ecol Appl, 30(2): 1-12.
SCHUPP EW, JORDANO P, GÓMEZ JM, 2010. Seed dispersal effectiveness revisited: a conceptual review [J]. New Phytol, 188(2): 333-353.
SHARPE DM, FIELDS DE, 1982. Integrating the effects of climate and seed fall velocities on seed dispersal by wind - a model and application [J]. Ecol Model, 17(3-4): 297-310.
WANG Y, ZHANG J, LAMONTAGNE JM, et al., 2017. Variation and synchrony of tree species mast seeding in an old-growth temperate forest [J]. J Veg Sci, 28(2): 413-423.
WALTER DK, JOHANNES MHK, 2000. Patterns of annual seed production by northern hemisphere trees: A global perspective [J]. Amer Nat, 155(1): 59-69.
WU JG, 2000. Landscape Ecology - Concepts and Theories [J]. Chin J Ecol,19 (1): 42-52. [邬建国, 2000. 景观生态学——概念与理论 [J]. 生态学杂志，19(1): 42-52.]
WILCOVE DS, MCLELLAN CH,DOBSON AP, 1986. Habitat fragmentation in the temperate zone [M]. Sunderland: Sinauer Associates Inc: 237-256.
XIAO J, HUANG L, YANG C, et al., 2019. Composition and spatial-temporal variation of the seed rain in an evergreen broad-leaved forest on Jinyun Mountain [J]. Sci Silv Sin, 55(7): 163-169. [肖静，黄力，杨超，等，2019. 缙云山常绿阔叶林种子雨组成及其时空动态 [J]. 林业科学，55(7): 163-169.]
YU SL, LANG NJ, PENG MJ, et al., 2007. Research advances in seed rain [J]. Chin J Ecol, 26(10): 1646-1652. [于顺利，郎南军，彭明俊，等，2007. 种子雨研究进展 [J]. 生态学杂志，26(10): 1646-1652.]
ZHANG J, KISSLING WD, HE F, 2013. Local forest structure, climate and human disturbance determine regional distribution of boreal bird species richness in Alberta, Canada [J]. J Biogeogr, 40(6): 1131-1142.
ZHONG YC , 2020. Patterns and influencing factors of seed predation, dispersal and germination, and early-stage seedling establishment in a fragmented landscape, eastern China [D]. Hangzhou: Zhejiang University: 1-73. [钟雨辰，2020. 片段化生境中种子捕食、扩散、萌发和幼苗早期建成模式及其影响因素 [D]. 杭州: 浙江大学: 1-73.]



附图 1 研究期间淳安县每月的 0 °C 上积温与降水量

Attached Fig. 1 Monthly accumulated temperature above 0 °C and precipitation in Chun’an County during the study period

附表 1 千岛湖 29 个样岛基本信息

Attached Table 1 Basic informations on 29 study islands in the Thousand Island Lake

岛屿编号 Island code	周长 Perimeter (m)	面积 Area (hm^2)	样地面积 Area of sampling (hm^2)	距大陆的距离 The distance to the mainland (m)	距最近的岛屿距离 The distance to the nearest island (m)	种子雨收集器个数 Number of seed traps
I68	104.65	0.08	0.02	947.67	8.05	3
I34	146.65	0.12	0.05	2 073.07	7.5	3
I60	166.59	0.14	0.12	387.1	22.42	3
I36	170.83	0.19	0.11	2 137.68	8.71	3
I59	221.61	0.19	0.06	398.18	22.42	3
I32	216.9	0.25	0.14	2 658.07	13.28	3
I73	207.13	0.25	0.13	3 650.55	73.91	3
I50	203.6	0.29	0.19	3 073.21	83.39	3
I33	274.91	0.36	0.14	2 227.08	7.5	3
I74	348.01	0.39	0.23	4 075.04	139.23	3
I69	245.27	0.42	0.22	1 056.16	28.36	3
I14	342.83	0.46	0.17	1 982.69	98.1	3
I35	370.6	0.53	0.19	1 939.94	16.68	6
I15	352.96	0.62	0.35	2 333.6	34.13	6
I72	423.07	0.69	0.36	200.31	34.01	6
I31	402.52	0.79	0.51	2 657.77	13.28	6
I58	451.51	0.84	0.49	690.03	44.87	6
I78	488.39	0.85	0.44	2 184.55	18.41	6
I75	716.39	0.86	0.25	3 609.61	32.89	6
I113	542.99	0.99	0.70	4 217.1	59.81	6
I64	561.71	1.31	0.62	868.22	8.05	12
I37	583.41	1.32	0.52	2 121.37	8.71	12
I63	602.6	1.33	0.67	730.95	29.2	12
I77	1 213.29	2.56	0.66	2 199.38	18.41	12
I43	1 364	3.7	0.88	2 225.45	12.66	12
I117	3 537.63	9.79	1.00	1 901.72	29.54	24
B7	5 622.3	27.49	1.03	1 158.87	47.82	24
B6	7 523.43	47.98	1.09	1 066.1	119.36	24
JSE	101 889.36	1 153.88	1.50	861	13.79	24

附表 2 2014—2015 年千岛湖 29 个样岛植物群落复查物种信息表

Attached Table 2 Species informations table for recensus of woody plant community on 29 study islands in the Thousand Island Lake from 2014 to 2015

物种 Species	科 Family	多度 Abundance
檵木 *Loropetalum chinense*	金缕梅科 Hamamelidaceae	62 530
短尾越橘 *Vaccinium carlesii*	杜鹃花科 Ericaceae	25 676
马尾松 *Pinus massoniana*	松科 Pinaceae	14 107
杜鹃 *Rhododendron simsii*	杜鹃花科 Ericaceae	11 490
格药柃 *Eurya muricata*	山茶科 Theaceae	7 112
黄檀 *Dalbergia hupeana*	豆科 Fabaceae	4 355
毛果南烛 *Lyonia ovalifolia* var. *hebecarpa*	杜鹃花科 Ericaceae	3 062
短柄枹 *Quercus serrata*	壳斗科 Fagaceae	2 970
乌饭树 *Vaccinium bracteatum*	杜鹃花科 Ericaceae	2 704
刺柏 *Juniperus formosana*	柏科 Cupressaceae	2 183
白栎 *Quercus fabri*	壳斗科 Fagaceae	1 902
木荷 *Schima superba*	山茶科 Theaceae	1 741
石斑木 *Rhaphiolepis indica*	蔷薇科 Rosaceae	1 540
毛花连蕊茶 *Camellia fraterna*	山茶科 Theaceae	1 413
乌药 *Lindera aggregata*	樟科 Lauraceae	1 204
杉木 *Cunninghamia lanceolata*	杉科 Taxodiaceae	1 193
冬青 *Ilex chinensis*	冬青科 Aquifoliaceae	1 107
江南越橘 *Vaccinium mandarinorum*	杜鹃花科 Ericaceae	1 100
马银花 *Rhododendron ovatum*	杜鹃花科 Ericaceae	1 033
石栎 *Lithocarpus glaber*	壳斗科 Fagaceae	843
苦槠 *Castanopsis sclerophylla*	壳斗科 Fagaceae	731
白檀 *Symplocos paniculata*	山矾科 Symplocaceae	615
麻栎 *Quercus acutissima*	壳斗科 Fagaceae	535
枫香树 *Liquidambar formosana*	金缕梅科 Hamamelidaceae	425
山矾 *Symplocos sumuntia*	山矾科 Symplocaceae	396
白花龙 *Styrax faberi*	安息香科 Styracaceae	394
野柿 *Diospyros kaki* var. *silvestris*	柿树科 Ebenaceae	342
山合欢 *Albizia kalkora*	豆科 Fabaceae	294
栀子 *Gardenia jasminoides*	茜草科 Rubiaceae	268
牡荆 *Vitex negundo* var. *cannabifolia*	马鞭草科 Verbenaceae	221
老鼠矢 *Symplocos stellaris*	山矾科 Symplocaceae	165
长叶冻绿 *Rhamnus crenata*	鼠李科 Rhamnaceae	153
山胡椒 *Lindera glauca*	樟科 Lauraceae	151
铁冬青 Ilex rotunda	冬青科 Aquifoliaceae	148
青冈 *Cyclobalanopsis glauca*	壳斗科 Fagaceae	136
垂珠花 *Styrax dasyanthus*	安息香科 Styracaceae	123
豆腐柴 *Premna microphylla*	马鞭草科 Verbenaceae	109
赤楠 *Syzygium buxifolium*	桃金娘科 Myrtaceae	88
茶荚蒾 *Viburnum setigerum*	忍冬科 Caprifoliaceae	49
野漆树 *Toxicodendron succedaneum*	漆树科 Anacardiaceae	43

长圆叶鼠刺 *Itea chinensis*	鼠刺科 Escalloniaceae	38
盐肤木 *Rhus chinensis*	漆树科 Anacardiaceae	24
樟 *Cinnamomum camphora*	樟科 Lauraceae	23
算盘子 *Glochidion puberum*	大戟科 Euphorbiaceae	22
乌桕 *Triadica sebifera*	大戟科 Euphorbiaceae	22
毛八角枫 *Alangium kurzii*	八角枫科 Alangiaceae	20
杨梅 *Myrica rubra*	杨梅科 Myricaceae	19
糯米条 *Abelia chinensis*	忍冬科 Caprifoliaceae	17
乌楣栲 *Castanopsis jucunda*	壳斗科 Fagaceae	13
小叶石楠 *Photinia parvifolia*	蔷薇科 Rosaceae	12
化香树 *Platycarya strobilacea*	胡桃科 Juglandaceae	11
枸骨 *Ilex cornuta*	冬青科 Aquifoliaceae	10
小构树 *Broussonetia kazinoki*	桑科 Moraceae	10
黄连木 *Pistacia chinensis*	漆树科 Anacardiaceae	8
白背叶 *Mallotus apelta*	大戟科 Euphorbiaceae	6
檫木 *Sassafras tzumu*	樟科 Lauraceae	6
豆梨 *Pyrus calleryana*	蔷薇科 Rosaceae	6
山鸡椒 *Litsea cubeba*	樟科 Lauraceae	6
山蜡梅 *Chimonanthus nitens*	蜡梅科 Calycanthaceae	6
白马骨 *Serissa serissoides*	茜草科 Rubiaceae	4
厚皮香 *Ternstroemia gymnanthera*	山茶科 Theaceae	4
单瓣李叶绣线菊 *Spiraea prunifolia* var. *simpliciflora*	蔷薇科 Rosaceae	3
柞木 *Xylosma congesta*	大风子科 Flacourtiaceae	3
豹皮樟 *Litsea coreana* var. *sinensis*	樟科 Lauraceae	2
大青 *Clerodendrum cyrtophyllum*	马鞭草科 Verbenaceae	2
流苏树 *Chionanthus retusus*	木犀科 Oleaceae	2
拟赤杨 *Alniphyllum fortunei*	安息香科 Styracaceae	2
山橿 *Lindera reflexa*	樟科 Lauraceae	2
山油麻 *Trema cannabina* var. *dielsiana*	榆科 Ulmaceae	1
榔榆 *Ulmus parvifolia*	榆科 Ulmaceae	1
马棘 *Indigofera bungeana*	豆科 Fabaceae	1
羊踯躅 *Rhododendron molle*	杜鹃花科 Ericaceae	1
野鸦椿 *Euscaphis japonica*	省沽油科 Staphyleaceae	1

附表 3 千岛湖 29 个样岛不同传播方式物种基本信息

Attached Table 3 Basic informations on species with different dispersal syndromes in 29 study islands in the Thousand Island Lake

物种 Species	科 Family	传播方式 Dispersal unit	果实类型 Fruit type	种子质量 Seed mass (g)
檵木 *Loropetalum chinense*	金缕梅科 Hamamelidaceae	自主传播 Autochory	蒴果 Capsule	0.026 411
短尾越橘 *Vaccinium carlesii*	杜鹃花科 Ericaceae	动物传播 Zoochory	浆果 Berry	0.000 327
马尾松 *Pinus massoniana*	松科 Pinaceae	风力传播 Anemochory	—	0.010 894
杜鹃 *Rhododendron simsii*	杜鹃花科 Ericaceae	自主传播 Autochory	蒴果 Capsule	0.000 089
格药柃 *Eurya muricata*	山茶科 Theaceae	动物传播 Zoochory	浆果 Berry	0.000 649
黄檀 *Dalbergia hupeana*	豆科 Fabaceae	风力传播 Anemochory	荚果 POD	0.013 088
毛果南烛 *Lyonia ovalifolia* var. *hebecarpa*	杜鹃花科 Ericaceae	自主传播 Autochory	蒴果 Capsule	0.000 025
短柄枹 *Quercus serrata*	壳斗科 Fagaceae	动物传播 Zoochory	坚果 Nut	0.247 040
乌饭树 *Vaccinium bracteatum*	杜鹃花科 Ericaceae	动物传播 Zoochory	浆果 Berry	0.000 455
刺柏 *Juniperus formosana*	柏科 Cupressaceae	动物传播 Zoochory	球果 Cones	0.019 493
白栎 *Quercus fabri*	壳斗科 Fagaceae	动物传播 Zoochory	坚果 Nut	0.422 160
木荷 *Schima superba*	山茶科 Theaceae	风力传播 Anemochory	蒴果 Capsule	0.005 059
石斑木 *Rhaphiolepis indica*	蔷薇科 Rosaceae	动物传播 Zoochory	梨果 Pome	0.096 600
毛花连蕊茶 *Camellia fraterna*	山茶科 Theaceae	动物传播 Zoochory	蒴果 Capsule	0.373 615
乌药 *Lindera aggregata*	樟科 Lauraceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.048 720
杉木 *Cunninghamia lanceolata*	杉科 Taxodiaceae	风力传播 Anemochory	—	0.003 096
冬青 *Ilex chinensis*	冬青科 Aquifoliaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.002 768
江南越橘 *Vaccinium mandarinorum*	杜鹃花科 Ericaceae	动物传播 Zoochory	浆果 Berry	0.000 094
马银花 *Rhododendron ovatum*	杜鹃花科 Ericaceae	风力传播 Anemochory	蒴果 Capsule	0.000 052
石栎 *Lithocarpus glaber*	壳斗科 Fagaceae	动物传播 Zoochory	坚果 Nut	0.141 060
苦槠 *Castanopsis sclerophylla*	壳斗科 Fagaceae	动物传播 Zoochory	坚果 Nut	0.726 440
白檀 *Symplocos paniculata*	山矾科 Symplocaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.021 640
麻栎 *Quercus acutissima*	壳斗科 Fagaceae	动物传播 Zoochory	坚果 Nut	1.005 520
枫香树 *Liquidambar formosana*	金缕梅科 Hamamelidaceae	风力传播 Anemochory	蒴果 Capsule	0.014 201
山矾 *Symplocos sumuntia*	山矾科 Symplocaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.001 287
白花龙 *Styrax faberi*	安息香科 Styracaceae	自主传播 Autochory	核果 Drupe	0.075 796
野柿 *Diospyros kaki* var. *silvestris*	柿树科 Ebenaceae	动物传播 Zoochory	浆果 Berry	0.333 891
山合欢 *Albizia kalkora*	豆科 Fabaceae	自主传播 Autochory	荚果 POD	0.022 301
栀子 *Gardenia jasminoides*	茜草科 Rubiaceae	动物传播 Zoochory	蒴果 Capsule	0.002 300
牡荆 *Vitex negundo* var. *cannabifolia*	马鞭草科 Verbenaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.001 500
老鼠矢 *Symplocos stellaris*	山矾科 Symplocaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.034 900
长叶冻绿 *Rhamnus crenata*	鼠李科 Rhamnaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.018 520
山胡椒 *Lindera glauca*	樟科 Lauraceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.027 560
铁冬青 *Ilex rotunda*	冬青科 Aquifoliaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.004 215
青冈栎 *Cyclobalanopsis glauca*	壳斗科 Fagaceae	动物传播 Zoochory	坚果 Nut	0.606 660
垂珠花 *Styrax dasyanthus*	安息香科 Styracaceae	自主传播 Autochory	核果 Drupe	0.087 089
赤楠 *Syzygium buxifolium*	桃金娘科 Myrtaceae	动物传播 Zoochory	浆果 Berry	0.099 340

荚蒾 *Viburnum setigerum*	忍冬科 Caprifoliaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.039 020
盐肤木 *Rhus chinensis*	漆树科 Anacardiaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.009 780
樟 *Cinnamomum camphora*	樟科 Lauraceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.153 300
乌桕 *Triadica sebifera*	大戟科 Euphorbiaceae	动物传播 Zoochory	蒴果 Capsule	0.178 413
毛八角枫 *Alangium kurzii*	八角枫科 Alangiaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.085 000
杨梅 *Myrica rubra*	杨梅科 Myricaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.249 800
化香树 *Platycarya strobilacea*	胡桃科 Juglandaceae	风力传播 Anemochory	翅果 Samara	0.007 334
枸骨 *Ilex cornuta*	冬青科 Aquifoliaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	0.024 823
小构树 *Broussonetia kazinoki*	桑科 Moraceae	动物传播 Zoochory	瘦果 Achene	0.000 970
白背叶 *Mallotus apelta*	大戟科 Euphorbiaceae	动物传播 Zoochory	蒴果 Capsule	0.008 671
豆梨 *Pyrus calleryana*	蔷薇科 Rosaceae	动物传播 Zoochory	梨果 Pome	0.008 331
山鸡椒 Litsea cubeba	樟科 Lauraceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	—
构树 *Broussonetia papyrifera*	桑科 Moraceae	动物传播 Zoochory	瘦果 Achene	—
金樱子 *Rosa laevigata*	蔷薇科 Rosaceae	自主传播 Autochory	蒴果 Capsule	0.028 345
楝 *Melia azedarach*	楝科 Meliaceae	动物传播 Zoochory	核果 Drupe	—

注：—表示该物种没有种子质量数据或该裸子植物没有果实。

Note: — indicates that the specie doesn’t have seed mass data or the gymnosperm has no fruit.